

# РАЗРАБОТКА ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ КАТАНКИ ИЗ МАЛОЛЕГИРОВАННЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Al-Zr

**Бернгардт В.А.**

*Руководитель – доцент, канд. техн. наук Дроздова Т.Н.*

ФГАОУ ВПО СФУ, г. Красноярск

Berngardt19@mail.ru

Развитие электротехнической промышленности в современных условиях ориентировано на использование материалов, которые сохраняют высокую прочность при эксплуатационных нагревах. Перспективными термически стабильными материалами с высокой электропроводностью и прочностью до температуры 310 °С являются малолегированные цирконием алюминиевые сплавы. Благоприятное сочетание электрических и механических свойств таких сплавов достигается легированием, деформацией и термической обработкой.

Основной целью работы было изучение влияния отжига на удельное электрическое сопротивление и механические свойства катанки из малолегированных сплавов системы Al-Zr с разной концентрацией циркония для достижения заданного уровня свойств. По международному стандарту ASTM B941-05 удельное электрическое сопротивление (УЭС) катанки не должно превышать 0,0285 Ом·мм<sup>2</sup>/м, временное сопротивление составлять не менее 120 МПа, относительное удлинение – не менее 8 %.

Исследовали сплавы с содержанием циркония 0,20 %, 0,24%, 0,29 % и примерно одинаковым количеством железа 0,27–0,29 % и этот элемент рассматривается как легирующий. Количество примесей, понижающих электропроводность сплавов, регламентировано и составляет сотые (Si, Zn) и тысячные (Ti, Mn) доли процентов. Катанку диаметром 9 мм из сплавов системы Al-Zr изготавливали непрерывным литьем заготовки на колесо литейно-прокатного агрегата и последующей сортовой прокатки многоклетьевого прокатного стана (ЛПА).

Исследование свойств катанки в деформированном состоянии показали, что значения удельного электрического сопротивления для сплавов с 0,20-0,27% находится в пределах 0,03178-0,03297 Ом·мм<sup>2</sup>/м, что существенно выше требований ASTM B941-05. Предел прочности для этих же сплавов в среднем 142 МПа, относительное удлинение 9 %.

На первом этапе работы по отработке режимов термической обработки катанки было проведено планирование эксперимента, для этого выбрали модель полного факторного эксперимента 2<sup>3</sup>. Факторами модели являлись: концентрация циркония ( $C_{Zr}$ ), температура отжига ( $t_{отж}$ ) и время выдержки ( $\tau$ ); откликами: временное сопротивление разрыву ( $\sigma_B$ ), УЭС ( $\rho$ ). После проверки значимости коэффициентов и адекватности модели получили уравнение:  $\sigma_B = 117,4 + 10,1C_{Zr} - 15,1 t_{отж} + 6,6 C_{Zr} t_{отж}$ . Временное

сопротивление разрыву ( $\sigma_b$ ) зависит от температуры отжига и концентрации циркония в сплаве. Заметное влияние оказывает двойное взаимодействие между концентрацией циркония и температурой отжига.

Все коэффициенты модели УЭС оказались статистически не значимыми, что свидетельствует об отсутствии влияния исследуемых факторов в изучаемых интервалах варьирования концентрации от 0,20 до 0,27 %, температуры отжига 300–450 °С и времени выдержки от 12 до 48 часов. Поэтому было принято решение определять оптимальные параметры отжига эмпирическим путем.

В работе с целью снижения УЭС катанки из исследуемых сплавов проводили непрерывный и ступенчатый отжиг при температурах от 300 до 500 °С и выдержкой 3–72 часа. Температура и длительность отжига определяет стадии распада пересыщенного твердого раствора, распределение и дисперсность выделений фазы  $Al_3Zr$ , рекристаллизационные процессы, а в результате электросопротивление и прочность сплавов. Анализ значений УЭС катанки из исследуемых сплавов при различных режимах отжига показал, что при выбранных параметрах отжига требуемого значения УЭС не было достигнуто. Минимальные значения УЭС катанки получены после отжига при выдержках 36 ч и более. Отжиг по выбранным режимам снижает прочность и повышает пластичность катанки, что связано с процессами возврата и рекристаллизации. Отжиг при температурах 300–400 °С незначительно влияет на предел прочности и относительное удлинение полуфабрикатов (рис.1). В отожженной при температурах выше 400 °С катанке из низколегированного сплава  $Al-0,2\%Zr$  прочностные свойства снижаются и не соответствуют заданным значениям. Значительное разупрочнение в сплаве  $Al-0,27\%Zr$  получено при температуре отжига 500 °С, поэтому данную температуру в дальнейшем исследовании не рассматривали.

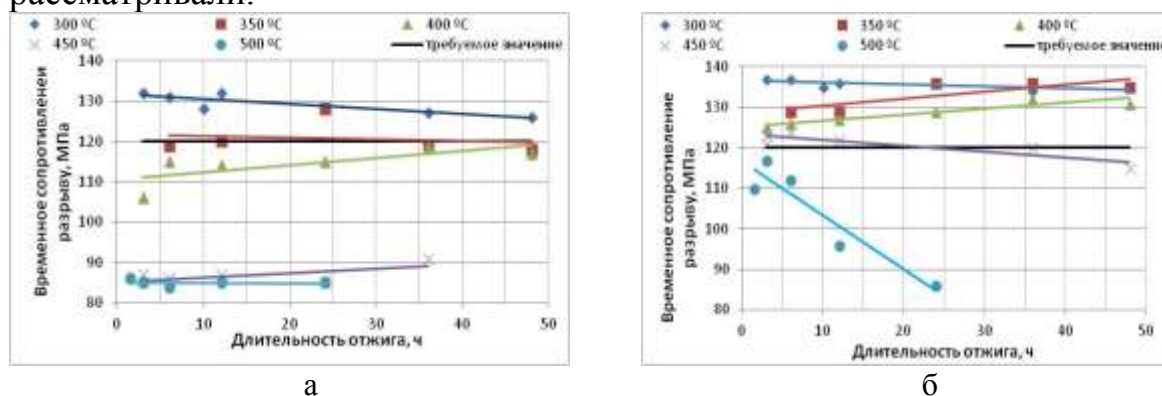


Рисунок 1 – Зависимости удельного временного сопротивления разрыву от температуры и длительности отжига сплава а –  $Al-0,2\%Zr-0,29\% Fe$ , б –  $Al-0,27\%Zr-0,27\% Fe$ .

Отжиг исследуемых сплавов при температурах 300–400 °С не приводит к изменению зеренной структуры, в катанке сохраняется волокнистость, характерная для деформированного состояния. Однако при

отжиге выше температуры 400°C в структуре изучаемых сплавов выявлены мелкие равноосные зерна на фоне волокнистой структуры, рис.2а. Цирконий более эффективно задерживает образование новых рекристаллизованных зерен в сплаве Al-0,27%Zr, поэтому рекристаллизованная структура формируется только при отжиге 500 °С, 24 ч, рис.2 б. Рекристаллизация проходит полностью в сплаве Al-0,2%Zr при отжиге по режиму 450 °С, 48 ч (рис.2 в). Выявленные изменения в зеренной структуре сплавов влияют на уровень прочности катанки после отжига. Для снижения удельного электросопротивления проволоки из малолегированных сплавов системы Al-Zr авторами работ рекомендовано использовать ступенчатый отжиг. В данной работе исследованы и предложены новые режимы ступенчатого отжига для катанки с заданным уровнем механических свойств и УЭС.



Рисунок 2 - Микроструктура сплавов в отожженном состоянии x50:  
а, б) Al-0,27%Zr; в) Al-0,2%Zr; а, в) 450 °С, 48ч; б) 500°C, 24ч

Повышение содержания циркония в сплаве должно обеспечить при отжиге увеличение количества выделений метастабильной упрочняющей фазы  $Al_3Zr$ . Поэтому следующие эксперименты были проведены на катанке сплава Al-0,27%Zr с максимальной концентрацией циркония.

Значения механических свойств и удельного электросопротивления катанки из сплава Al-0,27%Zr, отожженной по исследуемым режимам ступенчатого отжига, удовлетворяют требованиям ASTM B941-05, табл. 1. Таблица 1 – Свойства катанки сплава Al-0,27%Zr в отожженном состоянии

Отжиг	Состояние	$\rho$ , Ом·мм <sup>2</sup> /м	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %
ступенчатый	отжиг 300°C, 36ч + вторая ступень	0,02779	127	25
ступенчатый	отжиг 350°C, 48ч + вторая ступень	0,02803	134	23

В результате проведенных исследований для промышленного внедрения с учетом масштабного фактора был реализован ступенчатый режим термической обработки. Промышленное опробование на Братском алюминиевом заводе показало, что рекомендованный режим ступенчатого отжига позволяет достичь требуемый уровень свойств.

С целью обеспечения комплекса заданных свойств по прочности и УЭС катанки сплава Al-0,27%Zr для промышленного внедрения рекомендован ступенчатый отжиг, с температурой первой ступени 300 °С, выдержкой 36–48 часов. Катанка, отожженная по рекомендованному режиму на Братском алюминиевом заводе, соответствует заданным требованиям ASTM B941-05 по механическим свойствам и УЭС.